

$^{40}\text{Ca}(\pi, \pi^+)^{40}\text{K}$ 反応におけるスピン・アイソスピ ン反転遷移の研究

著者	加賀谷 聡
号	1051
発行年	1988
URL	http://hdl.handle.net/10097/24913

氏名・(本籍)	か が や 加賀谷	あきら 聡
学位の種類	理	学 博 士
学位記番号	理博第	1 0 5 1 号
学位授与年月日	昭 和 63 年	3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当	
研 究 科 専 攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 原子核理学専攻	
学位論文題目	$^{40}\text{Ca}(\gamma, \pi^+)^{40}\text{K}$ 反応におけるスピン・アイソスピン反転遷移の研究	
論文審査委員	(主査)	
	教 授 庄 田 勝 房	教 授 菅 原 真 澄
		教 授 石 井 紘

論 文 目 次

第 1 章	序 論
第 2 章	(γ, π) 反応の理論
第 3 章	$A=40$ 系の核構造
第 4 章	実験装置
第 5 章	実 験
第 6 章	解 析
第 7 章	結果と考察
第 8 章	結 論

論文内容要旨

[1] 序論

低エネルギー領域 ($T_{\pi} \lesssim 50 \text{ MeV}$) での (γ, π^{\pm}) 反応は、一般に遷移演算子 $\vec{\sigma} \cdot \vec{\varepsilon} \tau_{\pm}$ で良く記述される。ここで、 $\vec{\sigma}$ は核子のスピン、 $\vec{\varepsilon}$ は光子の偏極ベクトル、 τ_{\pm} は核子のアイソスピン昇降演算子である。従ってこの反応は、核子のスピン・アイソスピン反転遷移を選択的に励起する。この特色を生かして (γ, π^{\pm}) 反応による核分光学が行なわれている。現在までに対象となった原子核は主に 1p 殻核であり、2s1d 殻核より重い原子核に関する実験研究は、東北大学核理研で $^{24}\text{Mg} \cdot ^{28}\text{Si}$ について行なわれているだけである。この理由として、次の 2 つの事が挙げられる。

(i) (γ, π^{\pm}) 実験の主な方法は、電子線を標的原子核に照射して (e, π^{\pm}) 反応を行なうものである。この (e, π^{\pm}) スペクトルから、 (γ, π^{\pm}) 反応微分断面積を引き出す。電子線を使用する場合には、中重核になり原子番号 Z が増加すると共に、標的で散乱される e^{-} 及び標的で対生成される e^{+} が Z^2 に比例して増加する為、S/N 比が悪くなり実験が困難になること。

(ii) 中重核になるに従って終状態の準位密度が高くなり、連続エネルギーの光子を媒介とする実験の場合には、終状態の準位の分離が難しくなること。

本実験研究では、3 層のプラスチック・シンタレータ間の同時計数測定とチェレンコフ・カウンタによる反同時計数測定との組み合わせによって問題点 (i) を克服して、 (γ, π^{+}) 反応による中重核の核分光学の有効性を調べた。標的核としては、 ^{40}Ca を選んだ。この核は二重閉殻核であり、 (γ, π^{+}) 反応によって励起される残留核の低励起準位は一粒子一空孔模型で比較的良く記述されると考えられるからである。残留核状態の主配位と遷移多重極度を特定した後、電子散乱・ (p, n) 反応によるアナログ状態への遷移機構との比較を行なう。

[2] 実験と解析

実験は、核理研の電子線型加速器を用いて行なった。電子線を標的 ^{40}Ca に照射し、 (e, π^{+}) 反応で生成された π^{+} 中間子を磁気スペクトロメータで運動量分析した後、多芯比例計数管 (MWPC) とバックアップカウンタ (BC) とによって検出した。MWPC は荷電粒子の運動量決定の役割を、BC は粒子識別の役割をもつ。入射電子エネルギー (E_e) 185 MeV, π^{+} 検出角度 (θ_{π}) $50^{\circ}, 70^{\circ}, 90^{\circ}, 120^{\circ}, 150^{\circ}$ (移行運動量範囲; $q = 0.7 \sim 1.5 \text{ fm}^{-1}$)、残留核の励起エネルギー 7 MeV 以下の実験条件で、 $^{40}\text{Ca}(e, \pi^{+})^{40}\text{K}$ 反応による生成 π^{+} 中間子エネルギースペクトルとその角分布を測定した。

(e, π^{+}) 反応による生成 π^{+} 中間子のエネルギースペクトルから (γ, π^{+}) 反応微分断面積を求める際には、次式で表わされる両者の間の関係式を用いた：

$$\int \frac{d^2\sigma(Ee, \theta\pi, E\pi)}{dE\pi d\Omega} dE\pi = \sum_i \int \frac{d\sigma(E\gamma, \theta\pi, Ex^{(i)})}{d\Omega} N\gamma(Ee, E\gamma) dE\gamma$$

ここで、 $N\gamma(Ee, E\gamma)$ は光子スペクトル、 $E\gamma$ は光子エネルギー、 $Ex^{(i)}$ は残留核の i 番目の励起準位の励起エネルギーである。仮想光子の他に、標的原子核中での制動輻射による実光子も反応に関与する。本解析では、この寄与も考慮している。

[3] 結果と考察

第1図に本実験で得られた $^{40}\text{Ca}(e, \pi^+)^{40}\text{K}$ 反応スペクトルの例を、第2図に総てのスペクトル ($\theta\pi=50^\circ\sim 150^\circ$) を足し合わせたスペクトルを示す。 $^{40}\text{Ca}(\gamma, \pi^+)^{40}\text{K}$ 反応において残留核を特定の準位に残す強い π^+ 放出チャンネルが存在する時、これはスペクトル中の対応する励起エネルギーの位置に顕著な折れ曲がりとして現われる。第2図の曲線群は、 (e, π^+) 反応によって強く励起される準位の数と励起エネルギーとをパラメータとして χ^2 -fitting して得た最適化曲線群である。残留核を $Ex=0.0, 0.9, 2.7, 4.4$ 及び 6.1MeV に残す強い π^+ 放出チャンネルの存在が分かる。この様にして励起エネルギーを決定した後、各角度のスペクトルを解析し、残留核を各準位 ($0.0, 0.9, 2.7\text{MeV}$) に残す $^{40}\text{Ca}(\gamma, \pi^+)^{40}\text{K}$ 反応の微分断面積を求めた。この実験値に光子スペクトルを掛けて (e, π^+) スペクトルを計算したものが、第1図の曲線群である。スペクトルの立ち上がりに関して、計算結果と実験結果との一致は良い。

第3図・第4図は、 $^{40}\text{Ca}(\gamma, \pi^+)^{40}\text{K}$ [$Ex=0.0, 0.9\text{MeV}$] 反応微分断面積の角分布である。 180° 電子散乱¹⁾・ (p, n) 反応²⁾との比較から、前者は 4^- と 3^- 準位 ($Ex=0.0, 0.3\text{MeV}$) の寄与、後者は 2^- と 5^- 準位 ($Ex=0.80, 0.89\text{MeV}$) の寄与と考えられる。図中の曲線は $1d_{3/2} \rightarrow 1f_{7/2}$ の遷移を仮定したDWIA計算であり、電子散乱¹⁾から得られた規格化因子を用いている。計算値は角分布の形を良く再現しており、終状態の主配位が $1f_{7/2}1d_{3/2}^{-1}$ である事を示している。絶対値に関しては後者の準位への遷移の場合、実験値は計算値より50%程大きい。

次に近似の精度を上げて、終状態を $(2p_{1/2})(2s_{1/2})^{-1}$ 配位で記述した場合について考える。第5図・第6図は、Donnelly-Walker が Tamm-Dancoff 近似 (TDA) 計算によって求めた $1\hbar\omega$ 励起一粒子一空孔模型の核波動関数³⁾ [$Ex \leq 1.0\text{MeV}$ の準位の主配位は $1f_{7/2}1d_{3/2}^{-1}$] を用いたDWIA計算である。基底状態・ $Ex=0.9\text{MeV}$ 準位の角分布に対して、因子 $N=0.25 (\pm 0.05)$ 及び $0.46 (\pm 0.04)$ を掛けて実験値に規格化してある。この計算では、角分布の形は殆ど変わらず、絶対値のみが小さくなる。その結果として、終状態として $1f_{7/2}1d_{3/2}^{-1}$ のみを考えた場合と比べて規格化因子の値は大きくなる。この波動関数を用いて、アナログ状態への電子散乱横成分形状因子を計算したところ、実験値を再現するのに夫々の準位について規格化因子 $N=0.30 (\pm 0.01)$ 及び $0.27 (\pm 0.01)$ が必要と分かった。 (γ, π^+) 反応と電子散乱とでは、 $2^- \cdot 5^-$ 準位についての規格化因子が異なっている。電子散乱ではスピン電流と携帯電流の両者が寄与するのに対して、 (γ, π^+) 反応ではスピン電流のみが寄与する。従って、両実験結果から得た規格化因子が一致しないという事は、ここで用いた波動関数が各電流の寄与を正しく評価していない

い事を意味する。

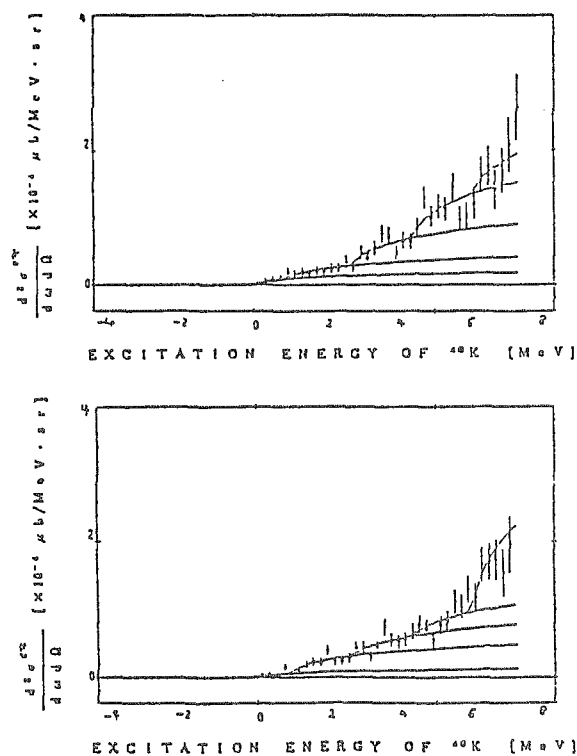
第7図・第8図は、 $^{40}\text{Ca}(\gamma, \pi^+)^{40}\text{K}^*$ [$E_x=2.7\text{MeV}$] 反応の角分布と DWIA 計算との比較である。ここでは、Donnelly-Walker の TDA 計算を基にして、奇パリティ準位の可能性を検討した。彼等の計算によると、 $(1f_{7/2}1d_{3/2}^{-1})^{J=2, 3, 4, 5}$ 粒子空孔バンドの次にエネルギーの低い $T=1$ 準位は $E_x(^{40}\text{K})=2.0\sim 3.0\text{MeV}$ に存在し、 $(2p_{3/2}1d_{3/2}^{-1})^{J=0, 1, 2, 3}$ 及び $(1f_{7/2}2s_{1/2}^{-1})^{J=3, 4}$ が主配位である。第7図・第8図の DWIA 計算はこれらの波動関数を用いた計算であり、規格化因子 $N=2.25 (\pm 0.49)$ 及び $0.55 (\pm 0.11)$ を掛けてある。角分布の形から、終状態の主配位は $1f_{7/2}2s_{1/2}^{-1}$ であると考えられる。TDA 計算では始状態 (^{40}Ca) に基底状態相関が考慮されていないので、TDA 計算による波動関数を用いて実験値を再現する為には一般に 1 より小さい規格化因子が必要である。この点からも、終状態は $1f_{7/2}2s_{1/2}^{-1}$ 配位が主要であると考えられる。 $3^- \cdot 4^-$ 準位への遷移は電子散乱・ (p, n) 反応によって $^{40}\text{Ca}(9.5\text{MeV}) \cdot ^{40}\text{Sc}(2.3\text{MeV})$ にも見られ、スピン・アイソスピン反転遷移に関してアナログ状態間で一致した結果が得られている。

[4] まとめ

$^{40}\text{Ca}(e, \pi^+)^{40}\text{K}$ 反応による生成 π^+ 中間子のエネルギー・スペクトルの測定により、 $E_x(^{40}\text{K}) \leq 7\text{MeV}$ 以下の低励起エネルギー領域に基底状態の他に 4 つの強いスピン・アイソスピン反転遷移の準位が見つかった。光子スペクトルを媒介として (γ, π^+) 反応微分断面積を求め、各準位への遷移強度の移行運動量依存性を調べる事によって、終状態の主配位と遷移多重極度を特定した。本研究によって、中重核における (γ, π^+) 反応による核分光学の有効性と DWIA による理論的記述の妥当性が示された。

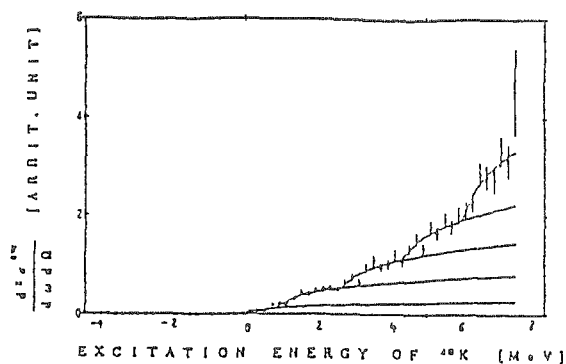
- 1) S. Oguro *et al.* ; Phys. Rev. C30 (1984) 1159.
- 2) T. Chittarakarn *et al.* ; Phys. Rev. C34 (1986) 80.
- 3) T.W. Donnelly and G.E. Walker ; Ann. of Phys. 60 (1970) 209.

図 1



第 1 図； $^{40}\text{Ca}(e, \pi^+)^{40}\text{K}$ 反応における生成 π^+ 中間子のエネルギースペクトルの例。
(上) $\theta_\pi = 70^\circ$, (下) $\theta_\pi = 120^\circ$ 。

図 2



第 2 図； $\theta_\pi = 50^\circ \sim 150^\circ$ の $^{40}\text{Ca}(e, \pi^+)^{40}\text{K}$ 反応スペクトルを足し合わせたスペクトル。図中の
実線は、準位数を 5 個とした場合の χ^2 -fitting の結果。

図 3

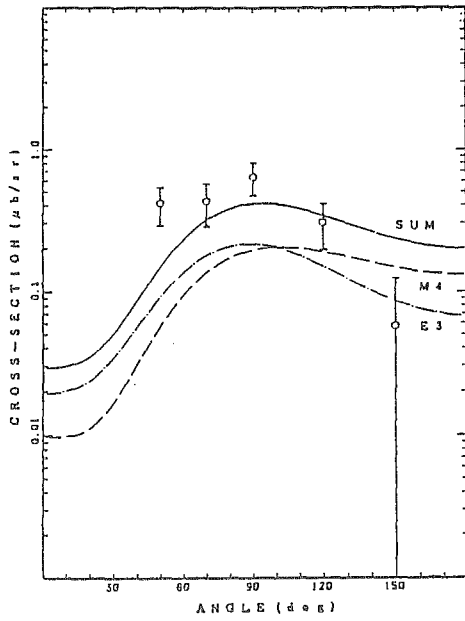
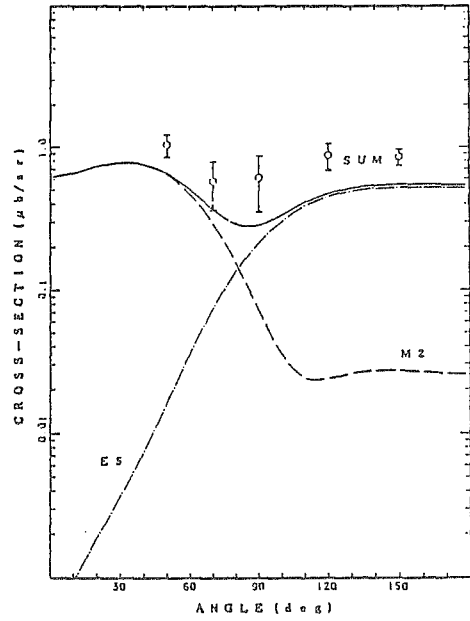


図 4



第 3 図： $^{40}\text{Ca}(\gamma, \pi^+)^{40}\text{K}_{gr}$ 反応の角分布と DWIA 計算との比較。終状態は、 $1f_{7/2}1d_{3/2}^{-1}$ 配位を仮定している。

第 4 図： $^{40}\text{Ca}(\gamma, \pi^+)^{40}\text{K}^* [0.9\text{MeV}]$ 反応の角分布と DWIA 計算との比較。終状態は、 $1f_{7/2}1d_{3/2}^{-1}$ 配位を仮定している。

図 5

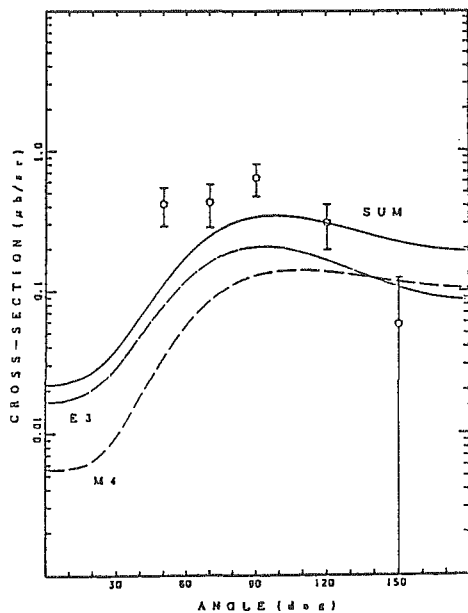
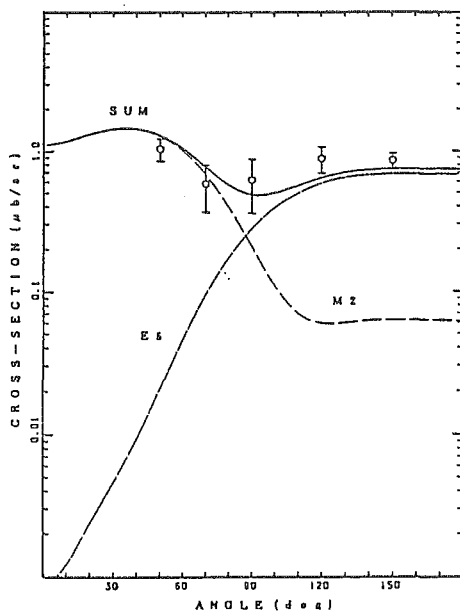


図 6



第 5 図： $^{40}\text{Ca}(\gamma, \pi^+)^{40}\text{K}_{\text{gr}}$ 反応の角分布と DWIA 計算との比較。Donnelly-Walker³⁾の波動関数の中で、 $1f_{7/2}1d_{3/2}^{-1}$ 配位が主配位のものを用いている。

第 6 図： $^{40}\text{Ca}(\gamma, \pi^+)^{40}\text{K}^*[0.9\text{MeV}]$ 反応の角分布と DWIA 計算との比較。Donnelly-Walker 波動関数の中で、 $1f_{7/2}1d_{3/2}^{-1}$ 配位が主配位のものを用いている。

図 7

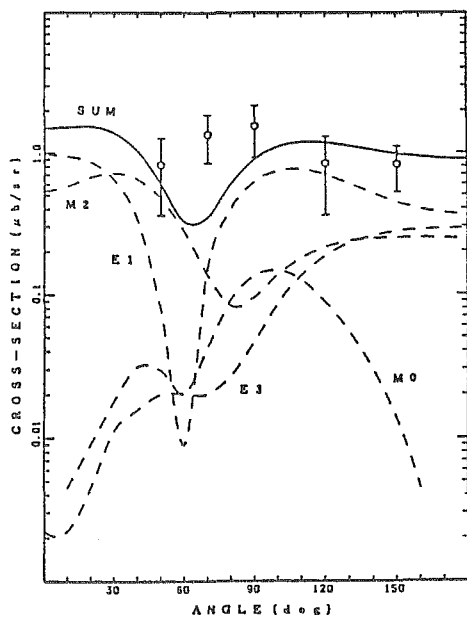
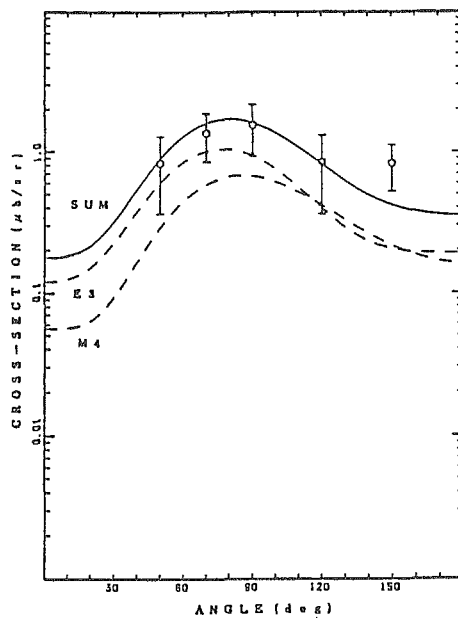


図 8



第 7 図： $^{40}\text{Ca}(\gamma, \pi^+)^{40}\text{K}^*[2.7\text{MeV}]$ 反応の角分布と DWIA 計算との比較。Donnelly-Walker 波動関数の中で、 $2p_{3/2}1d_{3/2}^{-1}$ 配位が主配位のものを用いている。

第 8 図： $^{40}\text{Ca}(\gamma, \pi^+)^{40}\text{K}^*[2.7\text{MeV}]$ 反応の角分布と DWIA 計算との比較。Donnelly-Walker 波動関数の中で、 $1f_{7/2}1d_{3/2}^{-1}$ 配位が主配位のものを用いている。

論文審査の結果の要旨

本論文は電子ビームによって ^{40}Ca から生成される π^+ 中間子のエネルギー分布を5つの角度で測定し、この結果から $E_\gamma \approx 185\text{MeV}$ における $^{40}\text{Ca}(\gamma, \pi^+)^{40}\text{K}$ 反応微分断面積を求めて、この反応の残留励起状態及び角分布の研究を行なったものである。

原子核の (γ, π) 反応はスピン・アイソスピン反転遷移が主であるので重要な研究手段であり、研究が続けられてきた。これまで1p殻核についての (γ, π^+) 反応の研究が多く実施され、その角分布は理論によって大体良く説明する事が出来る。重い核についての (γ, π) 反応の実験はバックグラウンドが大きい等のため困難である。このため1p殻核より重い核としては ^{24}Mg , ^{28}Si について実験が行なわれたにすぎない。この論文はこれまでの中で最も重い核 ^{40}Ca について (γ, π^+) 反応の実験研究を行なったものである。著者は生成 π^+ 中間子のスペクトルを磁気スペクトロメータを用いて測定した。 π^+ 中間子と陽電子を主体とするバックグラウンドの分離には3層の多線比例計数管の後部におかれた3層のプラスチックカウンター及びチェレンコフカウンターを用いた。

著者は π^+ 中間子のエネルギー分布の解析によって、残留核 ^{40}K の励起エネルギー $E_x \approx 0.0, 0.9, 2.7, 4.4, 6.1\text{MeV}$ に残す強い π^+ 放出チャネルの存在を発見した。また、各角度の π^+ エネルギー分布から $E_x \approx 0.0, 0.9, 2.7\text{MeV}$ に残す $^{40}\text{Ca}(\gamma, \pi^+)^{40}\text{K}$ 反応の微分断面積を求め、角分布を得た。得られた角分布は殻模型に基づく理論計算の結果と比較検討した結果、 $E_x \approx 0.0\text{MeV}$ に関しては $4^-(E_x=0.0\text{MeV})$, $3^-(E_x=0.03\text{MeV})$ 準位の寄与の和、 $E_x \approx 0.9\text{MeV}$ に関しては $2^-(E_x=0.80\text{MeV})$, $5^-(E_x=0.89\text{MeV})$ 準位の寄与の和で説明出来て、共に電子散乱による結論と大きな矛盾の無い事が分った。 $E_x \approx 2.7\text{MeV}$ に関しては電子散乱、 (p, n) 反応によって見出されている 1^+ 準位の寄与は小さく、 $(1f_{7/2}2s_{1/2}^{-1})$ 配位による $3^-, 4^-$ 状態の寄与が主要であると推論した。この結果により、 $^{40}\text{Ca}(\gamma, \pi^+)^{40}\text{K}$ 反応において、スピン・アイソスピン反転遷移の研究が可能である事が明らかとなり、更に新しく $E_x \approx 2.7\text{MeV}$ に $3^-, 4^-$ のスピン・アイソスピン反転状態が発見された。

以上この論文は著者が自立して研究活動を行うに必要な高度な研究能力と学識を有することを示している。よって加賀谷聡提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。